Functiegeneratoren

Een functiegenerator is een apparaat waarmee u minstens drie soorten signalen genereert, namelijk sinus, driehoek en rechthoek. Hiermee kunt u schakelingen testen en aansturen. In dit artikel vindt u uitgebreide achtergrondinformatie over dit in het hobby-lab onmisbaar meetinstrument.

Auteur: Jos Verstraten, Landgraaf, Nederland
Email: josverstraten@live.nl
Publicatiedatum: 02-12-2019

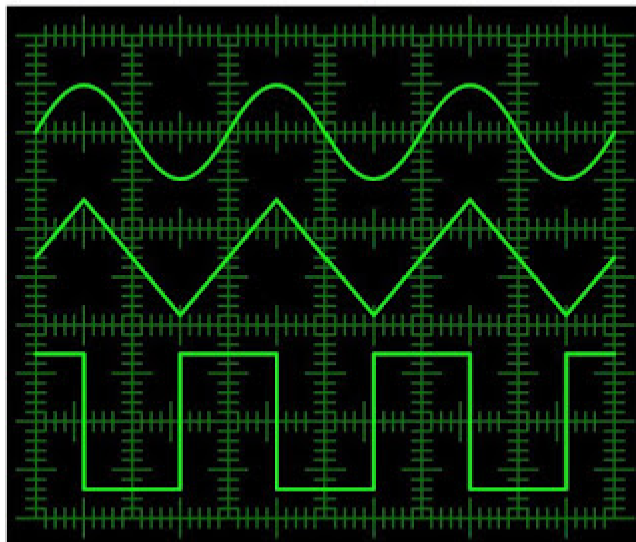
De specificaties van functiegeneratoren

De minimale eisen aan een functiegenerator

Zoals in de inleiding reeds gesteld moet een dergelijk apparaat in ieder geval de drie fundamentele spanningen van de elektronica genereren:

- Sinusvormige spanning (sine wave, SINE).
- Driehoekvormige spanning (triangle wave, TRI).
- Rechthoekvormige spanning (square wave, SQU).

Wij zetten de Engelstalige benamingen er achter omdat u deze op iedere functiegenerator aantreft.
Uiteraard kunt u de frequentie (Frequency) en de grootte (Amplitude) van deze signalen instellen over een breed bereik. Een eenvoudige functiegenerator is in feite, naast een universeelmeter en een goedkoop scoopje, een basisapparaat dat iedere hobby-elektronicus moet bezitten.



De drie uitgangssignalen van iedere functiegenerator.
(© 2019 Jos Verstraten)

Het frequentiebereik

Functiegeneratoren zijn te koop met zeer uiteenlopende frequentiebereiken. Hoe breder het bereik, hoe meer toepassingen de generator uiteraard heeft. Tóch moet u zich hierbij de vraag stellen wat u in uw praktijk aan signalen nodig hebt. Als u van plan bent voornamelijk te knutselen met audioschakelingen heeft het weinig zin geld uit te geven aan een

functiegenerator die tot 10 MHz signalen genereert. Met een goedkoop apparaat dat werkt tussen 10 Hz en 100 kHz kunt u al uw metingen uitvoeren.
Wilt u op alle mogelijke meetsituaties voorbereid zijn, dan doet u er verstandig aan een generator aan te schaffen die minstens tot 1 MHz maar nog beter tot 3 MHz gaat.

De uitgangsspanning
Goedkope generatoren hebben één potentiometer waarmee u de uitgangsspanning kunt instellen tussen 0 V en de maximale spanning die het apparaat genereert. Die maximale spanning moet minstens 10,0 $V_{top\text{-}tot\text{-}top}$ zijn, zodat u ook ongevoelige eindversterkers rechtstreeks met de uw generator kunt uitsturen tot maximaal vermogen.
Echter, deze apparaten met slechts één potentiometer voor het regelen van de amplitude zijn in de praktijk volledig onbruikbaar. Als u het frequentiebereik van een microfoonversterker moet opmeten hebt u een sinusvormige spanning van een paar millivolt nodig. Die kunt u met een enkele potentiometer nooit instellen, daar is dit onderdeel niet nauwkeurig genoeg voor.
Er moet, behalve deze potentiometer, nog een schakelaar aanwezig zijn, waarmee u diverse bereiken van de uitgangsspanning kunt instellen, bijvoorbeeld:

- 0 mV ~ 10 mV
- 0 mV ~ 100 mV
- 0 mV ~ 1 V
- 0 mV ~ 10V

Zo'n schakelaar wordt *'verzwakker'* genoemd, in het Engels 'Attenuator' (ATT).
Een tussenoplossing die goedkoper is dan zo'n meerstanden draaischakelaar wordt aangeboden onder de vorm van twee drukknopjes, waarmee u een signaalverzwakking van 20 dB en 40 dB kunt inschakelen. Dat komt er op neer dat u het uitgangssignaal dat u instelt met de potentiometer met een factor 10, 100 of 1.000 kunt verzwakken. Stelt u met de potentiometer een spanning in van 5,0 V, dan levert het indrukken van de eerste '-20 dB'-knop een signaal op van 500 mV en het indrukken van de '-40 dB'-knop een signaal van 50 mV. Drukt u beide drukknoppen in, dan levert de generator een spanning af die 60 dB is verzwakt, hetgeen overeen komt met 5 mV. Met zo'n systeem kunt u in de praktijk in de meeste gevallen wel uit de voeten.
Heeft de functiegenerator alleen een potentiometer, dan moet u werken met zelf in elkaar gesoldeerde verzwakkers met weerstanden die u op de uitgang van de generator aansluit.

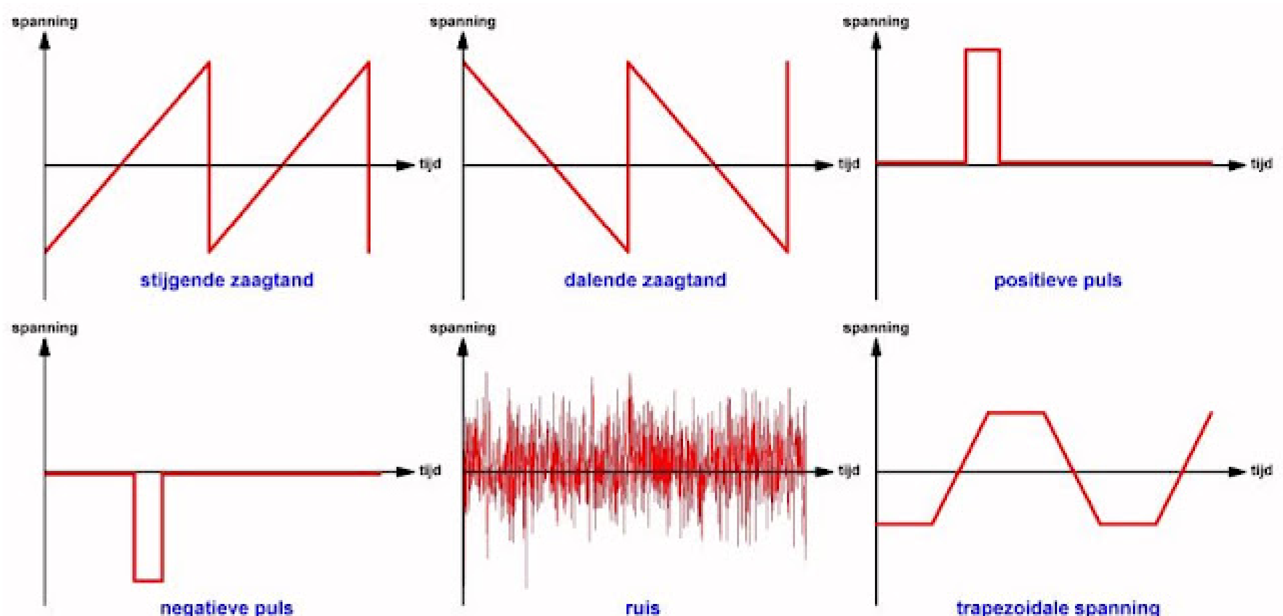


Een goed bruikbare instelling voor de grootte van de uitgangsspanning. (© 2019 Jos Verstraten)

Extra mogelijkheden
Functiegeneratoren van het betere soort bieden, behalve de mogelijkheid sinussen, driehoeken en rechthoeken te genereren, nog een heleboel andere mogelijkheden.

Veel meer signaalvormen
De oude analoog werkende generatoren (lees verder) konden meestal maar de drie genoemde basissignalen genereren. Moderne digitale functiegeneratoren bieden echter een vrijwel onbeperkt aantal golfvormen aan. De extra golfvormen die u het vaakst zult aantreffen zijn:

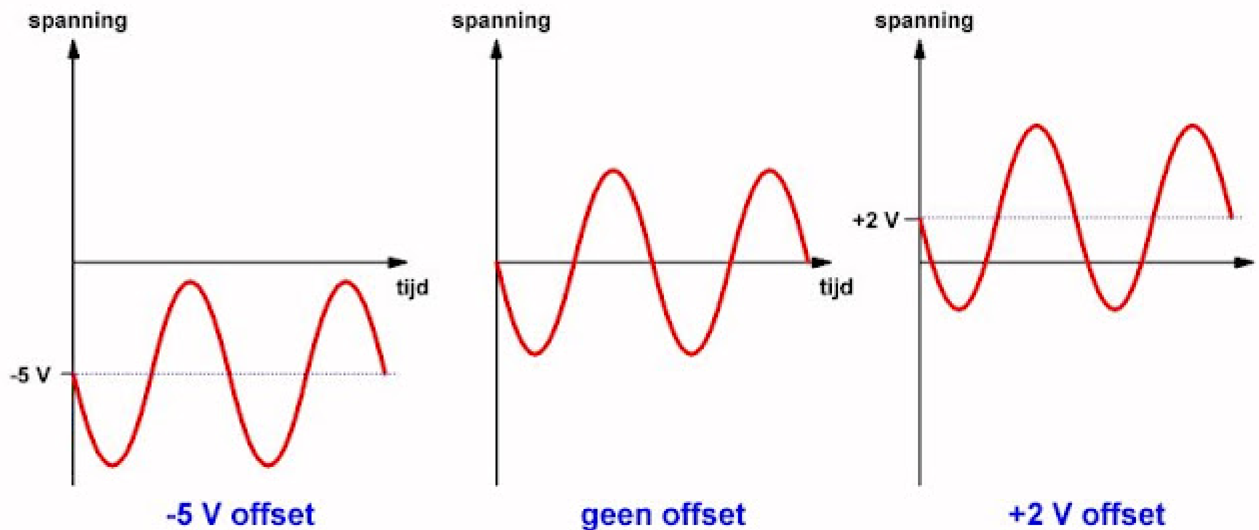
- **Zaagtandvormige spanningen (Sawtooth)**
  Deze kunnen zowel een positieve (stijgende) als een negatieve (dalende) helling hebben. In de praktijk zult u dergelijke signalen echter niet vaak nodig hebben.
- **Pulsvormige spanningen (Pulse)**
  Deze zijn rechthoekig van vorm, maar de verhouding tussen het deel van de puls dat een hoge spanning heeft en het deel dat een lage spanning heeft is niet 1/1. Deze pulsen kunt u bij het experimenteren met digitale schakelingen goed gebruiken.
- **Ruis (Noise)**
  Is een signaal waarvan zowel de frequentie als de grootte volledig willekeurig van waarde veranderen. Ruis is een handig soort signaal als u vaak experimenteert met akoestische metingen.
- **Trapezoidale spanning (Trapezoidal)**
  De benaming duidt al op de vorm van dit signaal. Overigens hebben wij in onze lab-praktijk nog nooit zo'n signaal nodig gehad.
- **Arbitraire spanningen (Arbitrary)**
  Deze optie treft u alleen bij digitale apparaten aan. Hiermee kunt u zélf de vorm van een signaal definiëren, bijvoorbeeld voor een speciale toepassing.



Extra spanningsvormen die duurdere functiegeneratoren genereren. (© 2019 Jos Verstraten)

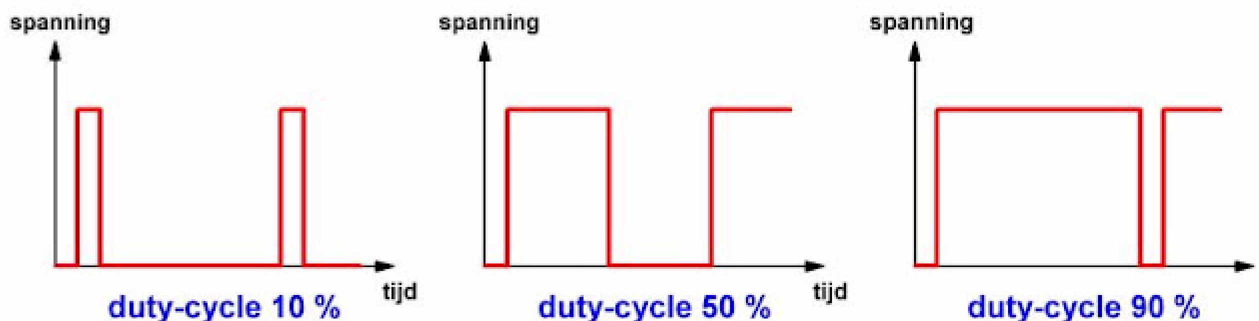
De offset functie
De meeste functiegeneratoren bieden de mogelijkheid het uitgangssignaal te superponeren op een instelbare gelijkspanning. Dit wordt de *'offset'* genoemd en daarvoor staat een extra potentiometer op de frontplaat ter beschikking. In de onderstaande illustratie is voorgesteld hoe de offset werkt. In de middelste grafiek is de offset uitgeschakeld of ingesteld op 0 V. In de linker grafiek is de offset ingesteld op -5 V, u ziet hoe de sinusspanning nu naar het negatieve deel van de grafiek opschuift en uitsluitend negatief is. In de rechter grafiek is de offset ingesteld op +2 V, de sinus schuift op naar boven en wordt meer positief dan negatief.

Overigens is de offset functie iets dat u in de praktijk niet vaak zult gebruiken.



De werking van de offset functie grafisch toegelicht. (© 2019 Jos Verstraten)

De duty-cycle of symmetry functie
Dat is een handige functie die op vrijwel alle functiegeneratoren aanwezig is. Met deze functie kunt u de tijd-symmetrie van het uitgangssignaal instellen. Dat is niet interessant als u de signaalvorm op sinus instelt, aan een niet tijd-symmetrische sinus heeft niemand wat. Het is echter wél interessant als u uw functiegenerator instelt op *'Square'* (rechthoek). Met de potentiometer *'DUTY'* of *'SYMM'* kunt u dan de tijd-symmetrie van de blokvormige spanning over een breed bereik regelen. De tijd-symmetrie wordt altijd uitgedrukt in procenten. Een blokgolf met een duty-cycle van 5 % heeft gedurende 5/100 van een periode een hoge spanning en gedurende 95/100 van de periode een lage spanning.

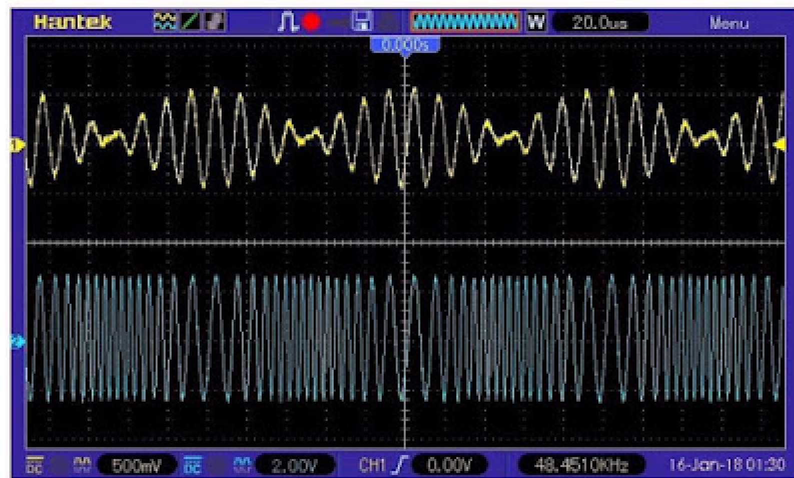


De werking van de symmetrie functie grafisch toegelicht. (© 2019 Jos Verstraten)

Diverse uitgangen
Goede functiegeneratoren hebben diverse uitgangen waarvan u het signaal kunt afnemen. Naast uitgangen met verschillende inwendige weerstanden, zoals 50 Ω, 75 Ω of 600 Ω, hebben deze allemaal een TTL- of SYNC-uitgang. Op deze uitgang staat steeds, welke golfvorm u ook gekozen hebt, een pulsvormige spanning ter beschikking met zeer kleine stijg- en daaltijden. Dit signaal kunt u gebruiken voor het extern triggeren van uw oscilloscoop. Staat bij deze uitgang de notatie *'TTL'*, dan kunt u deze puls bovendien rechtstreeks gebruiken voor het aansturen van digitale IC's uit de bekende 74xxx-familie.

Amplitude- en frequentiemodulatie
Duurdere functiegeneratoren bieden u de mogelijkheid het uitgangssignaal zowel in amplitude als in frequentie te moduleren. Bij deze systemen wordt de grootte of de frequentie van het uitgangssignaal gevarieerd op het ritme van een extra laagfrequent signaal. Als dit signaal groter wordt, dan stijgt de amplitude of de frequentie van het uitgangssignaal van de generator. Wordt dit signaal kleiner, dan zal de amplitude of de frequentie van het uitgangssignaal dalen. In het onderstaande oscillogram hebben wij de uitgangssignalen van

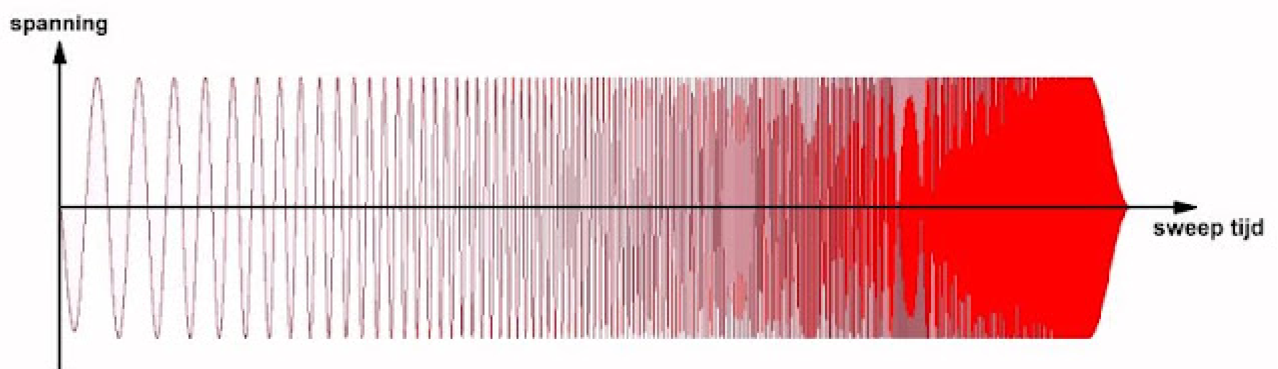
een met AM en een met FM gemoduleerde functiegenerator voorgesteld.



Amplitudemodulatie (boven) en frequentiemodulatie (onder) in beeld.
(© 2019 Jos Verstraten)

De sweep functie
Dat is handige functie die veel functiegeneratoren, zowel analoog als digitaal, aanbieden en waar u veel profijt van kunt hebben. Met deze functie kunt u de frequentie van het uitgangssignaal van de generator langzaam laten stijgen van een onderste grenswaarde naar een bovenste grenswaarde. De onderste grensfrequentie, de bovenste grensfrequentie en de tijd van de sweep zijn instelbaar. Op deze manier kunt u bijvoorbeeld een muziekversterker snel testen door in tien seconden te sweepen met een sinussignaal van 20 Hz tot 20 kHz. Met een oscilloscoop op de uitgang ziet u dan hoe goed de versterker het volledige audiobereik weergeeft.
Een extra optie is dat u lineair of logaritmisch kunt sweepen. Bij een lineaire sweep neemt de frequentie evenredig toe met het tijdsverloop van de sweep. Bij een logaritmische sweep neemt de frequentie met een factor tien toe per eenheid van de sweeptijd. Sweept u bijvoorbeeld logaritmisch van 10 Hz tot 1 MHz met een sweeptijd van vijf seconden, dan verloopt de uitgangsfrequentie van het signaal als volgt:

- Eerste seconde: 10 Hz ~ 100 Hz
- Tweede seconde: 100 Hz ~ 1 kHz
- Derde seconde: 1 kHz ~ 10 kHz
- Vierde seconde: 10 kHz ~ 100 kHz
- Vijfde seconde: 100 kHz ~ 1 MHz



Het uitgangssignaal van een gesweepte functiegenerator. (© 2019 Jos Verstraten)

Tone-burst
Sommige functiegeneratoren bieden een optie die *'tone-burst'* wordt genoemd. Hiermee kunt u het uitgangssignaal op commando van een extern signaal in- en uitschakelen. Hierbij zorgt de interne elektronica ervoor dat het schakelen altijd gebeurt nadat een volledige periode van het uitgangssignaal is gegenereerd. In de onderstaande figuur ziet u bijvoorbeeld zo'n tone-burst die bestaat uit vijf volledige perioden van een sinussignaal. Nadien zal de generator

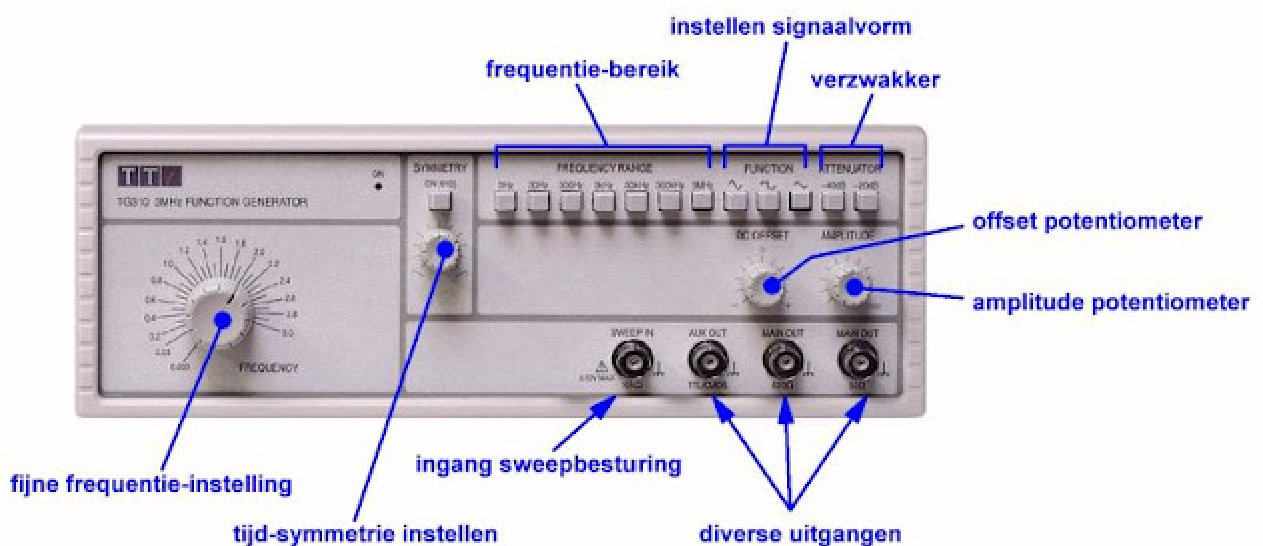
gedurende tien perioden geen signaal genereren.



Het uitgangssignaal van de tone-burst functie. (© 2019 Jos Verstraten)

Analoog contra digitaal

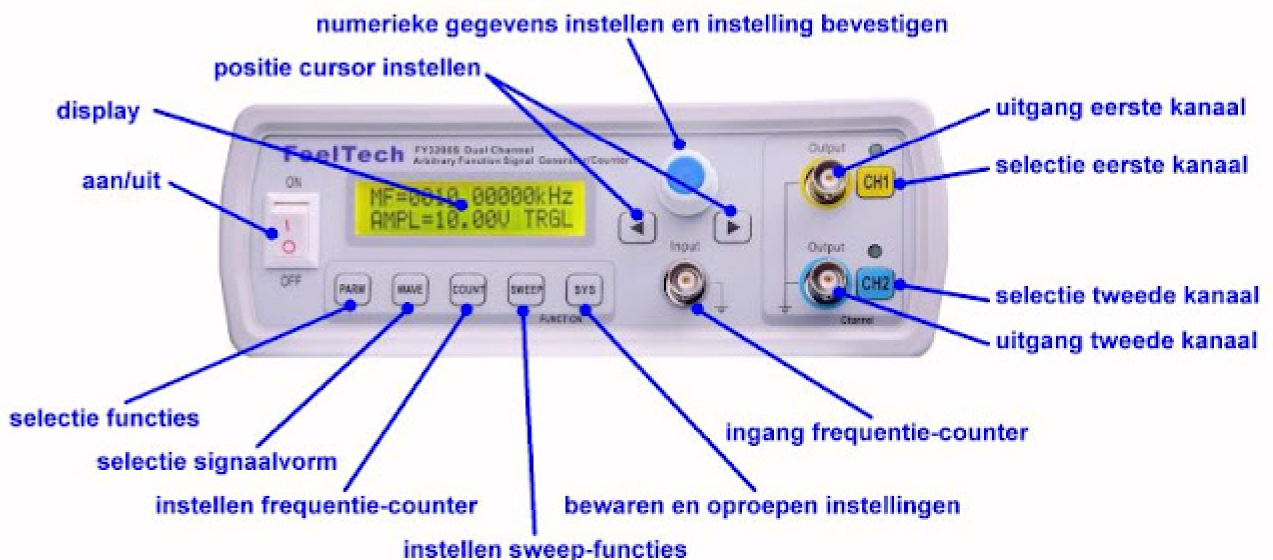
Is analoog ouderwets?
Vroeger werden er alleen functiegeneratoren verkocht die volledig met analoge schakelingen waren samengesteld. Dergelijke apparaten zijn dus volledig verouderd, maar worden nog wél tweedehands aangeboden voor vaak zeer interessante prijzen. Voor een prijsje van € 25,00 kunt u via eBay of Markplaats een functiegenerator kopen die in de vorige eeuw als nieuw apparaat een veelvoud van dit bedrag heeft gekost.
U herkent zo'n analoog apparaat aan het feit dat de frontplaat een heleboel draaipotentiometers en een aantal draai- of drukschakelaars bevat. Dat is meteen ook het grote voordeel van dergelijke apparaten. U kunt ze heel gemakkelijk bedienen. Door aan twee knopjes te draaien schakelt u in twee seconden om van een uitgangssignaal van 20 Hz naar een uitgangssignaal van 25 kHz. Dat doet u écht niet zo gemakkelijk en snel met moderne digitale apparaten!
In de onderstaande foto is het typisch uiterlijk van een analoge functiegenerator voorgesteld, de TG310 van AIM-TTI INSTRUMENTS. In deze figuur zijn de diverse reeds besproken functies aangegeven.



Het typisch uiterlijk van een analoge functiegenerator. (© 2019 Jos Verstraten)

De moderne digitale functiegenerator
In de onderstaande foto wordt een typische vertegenwoordiger van deze moderne apparaten voorgesteld, de Chinese FY3200S. Het eerste dat opvalt is dat er maar één draaiknop op het apparaat aanwezig is, maar wel een heleboel drukknopjes. Met deze drukknopjes selecteert u één functie van het apparaat en door aan de draaiknop te draaien kunt u de specificaties

van de geselecteerde functie instellen. Deze handelingen worden natuurlijk begeleid door teksten in het display. Achter deze ene draaiknop gaat overigens geen draaipotentiometer schuil, maar een zogenaamde encoder die pulsjes levert als u er aan draait. De in de functiegenerator aanwezige microprocessor detecteert de volgorde van deze pulsjes en interpreteert wat u aan het doen bent.
Het nadeel van een dergelijk apparaat is dat u niet even snel de frequentie verandert van 20 Hz naar 25 kHz. Daarvoor moet u veel meer handelingen verrichten dan bij een analoog apparaat. Voordelen van digitale functiegeneratoren zijn dat zij in het algemeen veel meer functies aanbieden dan hun analoge soortgenoten en een stuk goedkoper zijn. Wij hebben het dan uiteraard over de prijs van een nieuw apparaat.
De meeste digitale functiegeneratoren hebben bovendien twee identieke kanalen ingebouwd die u volledig onafhankelijk van elkaar kunt instellen. Omdat dit instellen gaat met dezelfde knopjes wordt het bedienen van het apparaat er echter niet overzichtelijker door, wel integendeel!
Tot slot zij nog vermeld dat vrijwel alle digitale functiegeneratoren ook nog een ingang hebben waarop u een signaal kunt aansluiten waarvan u de frequentie wilt meten. Na het bedienen van een aantal drukknopjes en draaien aan de encoder verschijnt dan de frequentie van dit signaal op het display.



Het typisch uiterlijk van een digitale functiegenerator. (© 2019 Jos Verstraten)

De functiegenerator versus de sinusgenerator
Naast functiegeneratoren kunt u ook echte sinusgeneratoren (Sine Wave Generator) tweedehands aantreffen. Deze generatoren wekken alleen sinusvormige en vierkantvormige signalen op. Deze apparaten werken echter heel anders dan functiegeneratoren. Bij deze generatoren wordt een sinusvormige spanning gegenereerd door een echte sinusoscillator. Dit signaal wordt nadien omgezet in een vierkant. Het voordeel van sinusgeneratoren is dat men in staat is de vervorming op de sinus tot nauwelijks meetbare waarden terug te brengen. Een sinusgenerator kan een uitgangssignaal opwekken waarvan de harmonische vervorming slechts 0,01 % bedraagt! Dat is met functiegeneratoren absoluut onmogelijk. U moet rekening houden met een harmonische vervorming op de sinusuitgang van 0,1 tot zelfs 1,0 %.
In de praktijk is dat voor slechts één soort meting bezwaarlijk. Het is met een functiegenerator absoluut onmogelijk om vervormingsmetingen aan een laagfrequent versterker uit te voeren. De eigen vervorming op het uitgangssignaal is immers veel groter dan de vervorming van zelfs de slechtste versterker. Maar in de praktijk zullen niet veel hobbyisten de noodzakelijke dure extra apparatuur (zeer scherpe afgestemde filters en een analoge millivoltmeter) in huis hebben om vervormingen te kunnen meten, zodat deze beperking in de praktijk niet zo'n rol speelt.



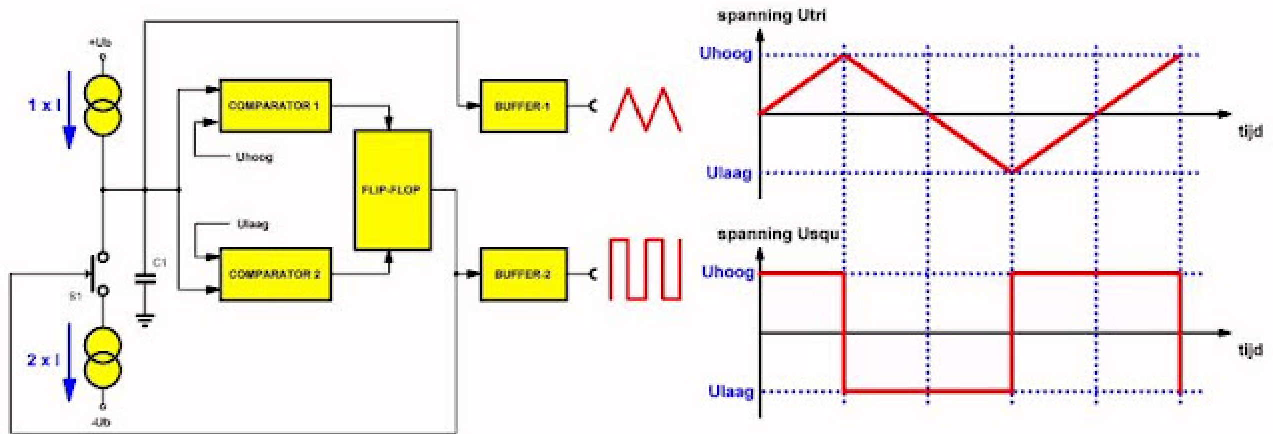
Het typisch uiterlijk van een sinusgenerator. (© eBay)

De werking van analoge functiegeneratoren

De blokschematische samenstelling
Een analoge functiegenerator is samengesteld uit een spanning- of stroomgestuurde oscillator, een zogenoemde *'VCO'* of *'CCO'*. Deze schakeling is verantwoordelijk voor het genereren van de rechthoek- en driehoekvormige uitgangssignalen. Door in de ingang van deze schakeling een gelijkstroom te sturen, of er een gelijkspanning op aan te leggen, zal over een externe condensator een mooie driehoek ontstaan. Op een andere pen kan de rechthoek afgetakt worden. Daarnaast bevat het apparaat een schakeling die de driehoekvormige spanning omzet in een min of meer zuivere sinus.

De gecontroleerde oscillator
Het principe van de gecontroleerde oscillator is getekend in de onderstaande figuur. Een condensator C1 is vast verbonden met een constante stroombron [1 x I]. De stroom van deze stroombron zal de condensator opladen. Hierdoor zal de spanning over de condensator lineair stijgen in functie van de tijd. Door middel van de elektronische schakelaar S1 kunt u echter een tweede stroombron [2 x I] met de condensator verbinden. Deze stroombron levert geen stroom zoals zijn soortgenoot, maar neemt een constante stroom op. Deze stroom heeft de dubbele waarde van de stroom I. Dat feit is heel erg belangrijk, want het bepaalt de werking van de schakeling in hoge mate. Als de schakelaar S1 open is zal de condensator geladen worden door de stroom [1 x I]. De spanning over het onderdeel stijgt dus lineair. Als de schakelaar S1 gesloten wordt, zal de stroom [1 x I] van de bovenste stroombron volledig afvloeien naar de onderste stroombron. Maar omdat deze stroombron een stroom van [2 x I] trekt, zal de tweede I geleverd worden door de condensator. De condensator wordt nu dus ontladen door een stroom I, met als gevolg dat de spanning over het onderdeel lineair daalt. Door het openen en sluiten van de elektronische schakelaar kunt u dus de condensator ofwel opladen met een stroom I, ofwel ontladen met een stroom I.
Het in- en uitschakelen van de elektronische schakelaar wordt gecontroleerd door een flip-flop en twee comparatoren. De twee comparatoren vergelijken de spanning over de condensator met twee drempelspanningen U_{hoog} en U_{laag}. Wordt de spanning over de condensator groter dan U_{hoog}, dan klapt de bovenste comparator om. De flip-flop wordt

gereset en zijn uitgang stuurt de schakelaar S1 in geleiding. De condensator wordt nu dus ontladen, totdat de spanning erover kleiner wordt dan U_{laag}. Op dat moment levert de onderste comparator een uitgang af, die de flip-flop weer set. De uitgang van de flip-flop schakelt om, de schakelaar S1 wordt weer geopend. Over de condensator C ontstaat dus een driehoekvormige spanning, de uitgang van de flip-flop levert een rechthoekvormige spanning. Beide signalen gaan in de meeste gevallen naar buffers die ervoor zorgen dat externe invloeden de werking van de schakeling niet kunnen verstoren. De driehoek- en blokvormige spanningen kunnen van de bufferuitgangen worden afgenomen.

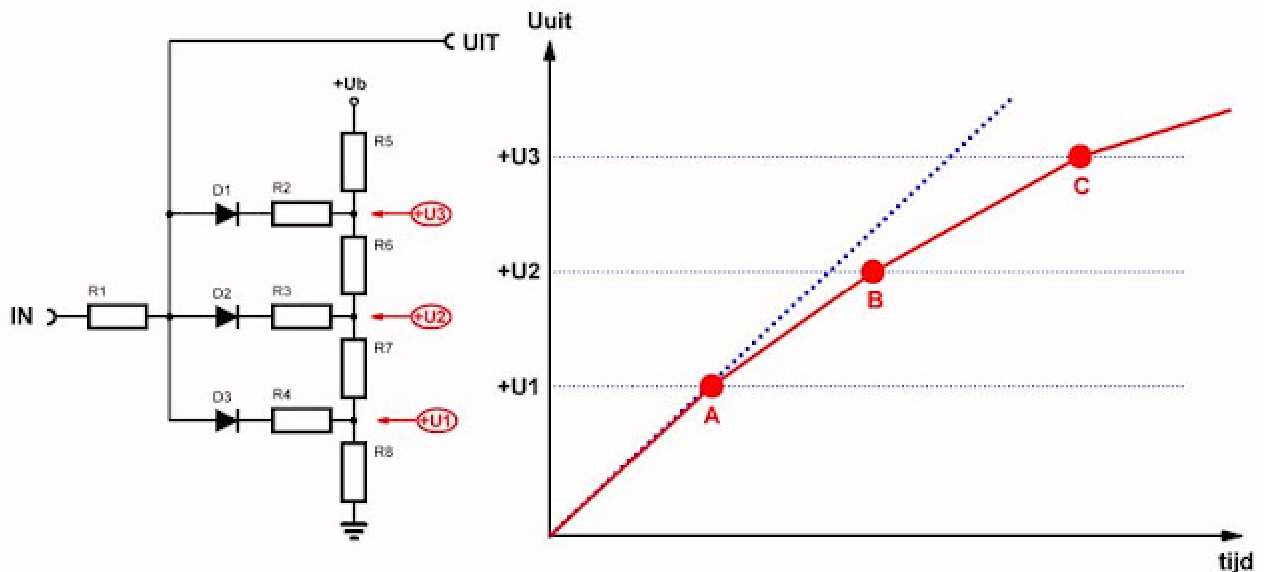


Het principe van de generatie van de driehoek- en rechthoekvormige signalen.
(© 2019 Jos Verstraten)

Van driehoek naar sinus

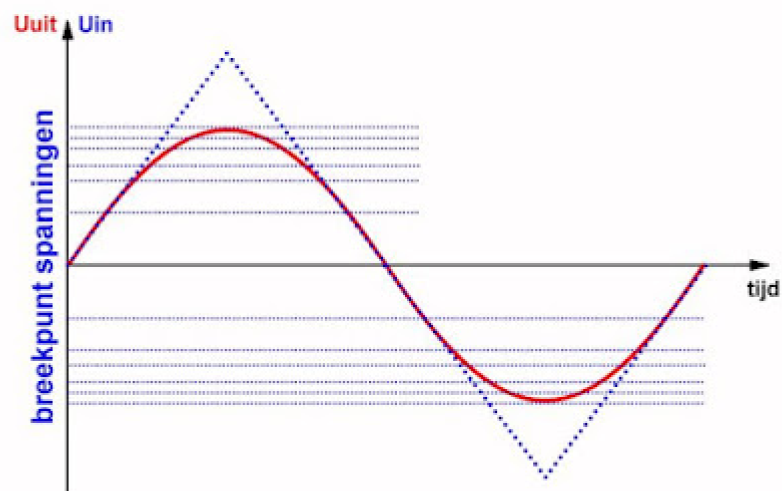
Alle analoge functiegeneratoren maken gebruik van een schakeling waarvan de versterking afhankelijk is van de grootte van het ingangssignaal. Hoe groter het ingangssignaal wordt, hoe minder de schakeling versterkt. Stuurt u nu zo'n schakeling met een driehoek, dan zullen de toppen van de driehoek worden afgeplat omdat de ingangsspanning dan uiteraard maximaal is en de versterking van de schakeling minimaal. Op deze manier ontstaat op de uitgang van de schakeling een spanning die een benadering is van een sinusvorm. Meer dan een benadering van een sinus kan een functiegenerator niet maken! Het principe van de schakeling is, in heel erg vereenvoudigde vorm, getekend in onderstaande figuur. De ingangsspanning is de driehoekvormige spanning, die door de VCO of CCO wordt geleverd. Deze spanning gaat via de weerstand R1 naar de uitgang. Tussen de uitgang en de massa is een ingewikkeld systeem opgenomen dat in principe niets anders is dan een spanningsafhankelijke verzwakker.
De werking berust op het gegeven dat een silicium diode gaat geleiden als de spanning op de anode 0,65 V positiever wordt dan de spanning op de kathode. De drie dioden die in het schema getekend zijn worden door middel van de spanningsdeler R5, R6, R7 en R8 ingesteld op positieve kathodespanningen.
Stel nu dat de spanning op de ingang kleiner is dan $+U_1$. De anoden van de dioden zijn negatiever dan de kathoden, met als gevolg dat alle dioden sperren. De ingangsspanning gaat dan via de weerstand R1 onverzwakt naar de uitgang. Als de momentele waarde van de driehoek op de ingang echter groter wordt dan $+U_1$, gaat de diode D3 geleiden. Er vloeit nu via deze diode en de in serie geschakelde weerstand R4 een stroom naar de spanningsdeler. Deze stroom kan alleen geleverd worden door de ingangsspanning, zodat er ook door de weerstand R1 een stroom vloeit. Over deze weerstand ontstaat een spanningsval, met als gevolg dat de uitgangsspanning kleiner zal zijn dan de ingangsspanning. Het netwerkje R1, D3, R4 en R8 vormt als het ware een spanningsdeler, die er voor zorgt dat de uitgangsspanning kleiner zal zijn dan de ingangsspanning. Dit is in de grafiek aangegeven met het gebied A/B. De gestippelde lijn geeft het verloop van de ingangsspanning weer, de volle lijn het verloop van de uitgangsspanning.
Duidelijk blijkt dat in het gebied A/B de ingangsspanning steeds kleiner is dan de uitgangsspanning. Als de driehoek op de ingang groter wordt dan $+U_2$ gaat ook de diode D2 geleiden. Er vloeit nu een tweede stroom af naar de massa en wel via R1, D2, R3, R7 en R8. Er vloeien nu twee stromen door R1, met als gevolg dat er meer spanning tussen de ingang

en de uitgang verloren gaat. Het verschil tussen de uitgangsspanning en de ingangsspanning wordt nog groter, zie het stukje grafiek B/C. Als de ingangsspanning groter wordt dan $+U_3$ gaat ook de diode D1 geleiden. Er vloeit nu een derde stroom door R1, die via de diode D1 en de weerstanden R2, R6, R7 en R8 afvloeit naar de massa. Het spanningsverschil tussen in- en uitgang wordt nog groter.



Het principe van de omzetting van de driehoek- in een sinusspanning. (© 2019 Jos Verstraten)

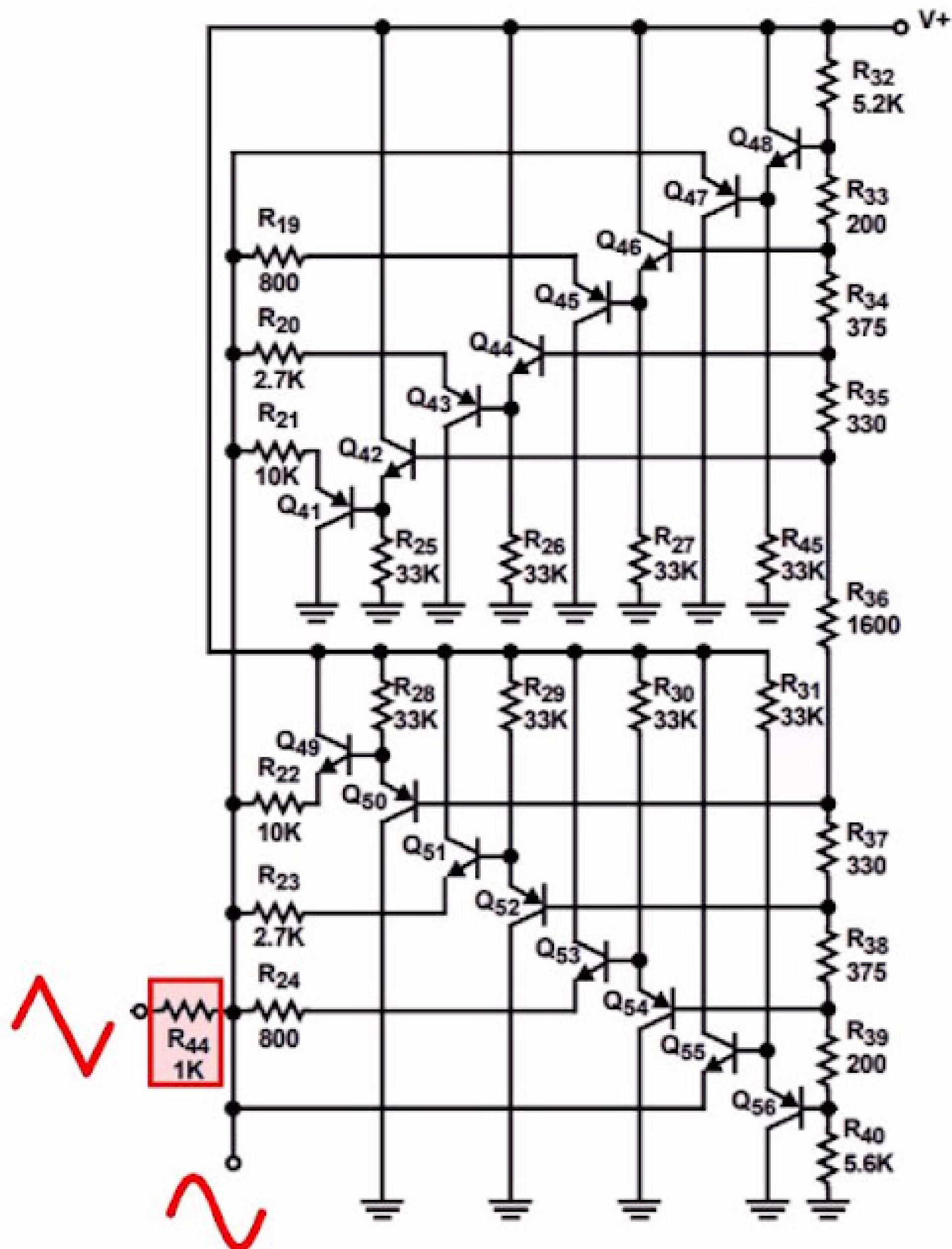
Als u het verloop van de uitgangsspanning A/B/C goed bekijkt, stelt u vast dat naarmate de uitgangsspanning stijgt, het verloop ervan in functie van de tijd steeds platter verloopt. Dat is min of meer wat ook bij een sinus gebeurt. Tekent u de in- en uitgangsspanningen op een wat kleinere schaal, dan ontstaat de grafiek van onderstaande figuur. Duidelijk blijkt nu hoe de driehoekspanning door de spanningsafhankelijke verzwakker wordt omgezet in iets dat op een sinus lijkt.
Het zal duidelijk zijn dat men in de praktijk natuurlijk meer dan drie diode netwerken inbouwt en dat men een soortgelijke schakeling moet aanbrengen voor het beïnvloeden van de negatieve helft van de driehoek. Verder is het zonneklaar dat de nauwkeurigheid van de omzetting heel veel te maken heeft men de keuze van de waarden van alle weerstanden. Wil men immers het verloop van een sinus zo goed mogelijk benaderen, dan moet men de *'breekpunten'* in de driehoek naar sinus omzetting heel precies berekenen en voor ieder breekpunt de gewenste verzwakking al even precies bepalen.



De volledige omzetting van een driehoek in een sinus. (© 2019 Jos Verstraten)

Dat in de praktijk nogal ingewikkelde schakelingen worden gebruikt toont de onderstaande

figuur. Deze toont het schema van de driehoek naar sinus omzetter in de ICL8038 functiegenerator chip. Hier worden de dioden van het principeschema vervangen door een heleboel transistoren die op een bepaald moment in het verloop van de driehoekspanning in geleiding worden gestuurd en de belasting van de driehoek laten toenemen. Hierdoor stijgt de stroom door weerstand R44. Er valt dus steeds meer spanning over deze weerstand en wordt hetzelfde *'afplattingseffect'* verkregen als met de dioden.

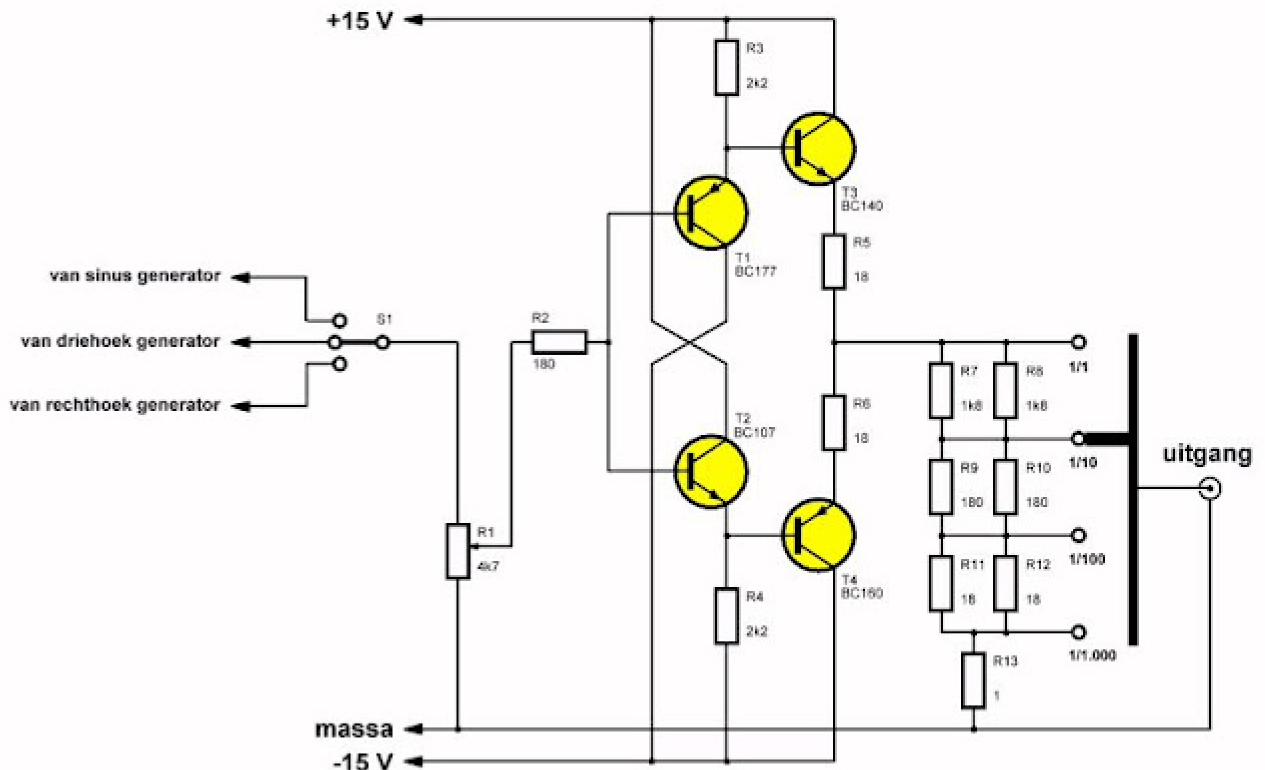


Een praktische schakeling van de driehoek naar sinus omzetter. (© Harris Semiconductor)

De uitgangstrap

Het genereren van mooie sinussen, blokken en driehoeken is één ding, deze signalen geschikt maken voor praktisch gebruik is een heel andere kwestie. De beschreven schakelingen hebben een vrij hoge uitgangsimpedantie, met als gevolg dat deze schakelingen niet in staat zijn middelzware resistieve of capacitieve belastingen rechtstreeks aan te sturen. Dat kan alleen als de uitgangen van de schakelingen worden afgesloten met een bufferversterker, die in staat is stromen van minstens 50 mA te leveren. Nu is het ontwerpen van zo'n schakeling niet zo eenvoudig. Als die versterker alleen sinussen zou moeten versterker was er geen probleem. Maar de bedoeling is uiteraard dat ook de driehoeken, blokken en eventueel zaagtanden en pulsen keurig door de schakeling komen. Nu hebben deze signaalvormen allemaal veel hoge harmonischen. Als u dus een eindtrap wilt ontwerpen die een blokspanning van 100 kHz zonder merkbare vervorming doorlaat, dan moet zo'n trap een bandbreedte van minstens 2 MHz hebben.

Onderstaande figuur geeft een eenvoudig schemaatje van een universele eindtrap, die zich letterlijk duizendvoudig in de praktijk heeft bewezen. Het is een complementair ontwerp, dat in een heleboel analoge functiegeneratoren in de een of andere vorm wordt toegepast. Dank zij deze speciale complementaire structuur is de bandbreedte zeer hoog, zodat blokspanningen van 200 kHz zonder merkbare vervorming uit de trap komen. Nadeel is dat de spanningsversterking gelijk is aan een, er wordt dus geen spanning versterkt, wel uiteraard stroom. De uitgangsstroom bedraagt maximaal ±50 mA. De trap wordt afgesloten met een resistieve 1/10/100/1.000 spanningsdeler, zodat de uitgangsspanning van de functiegenerator tot op de millivolt nauwkeurig kan worden ingesteld.



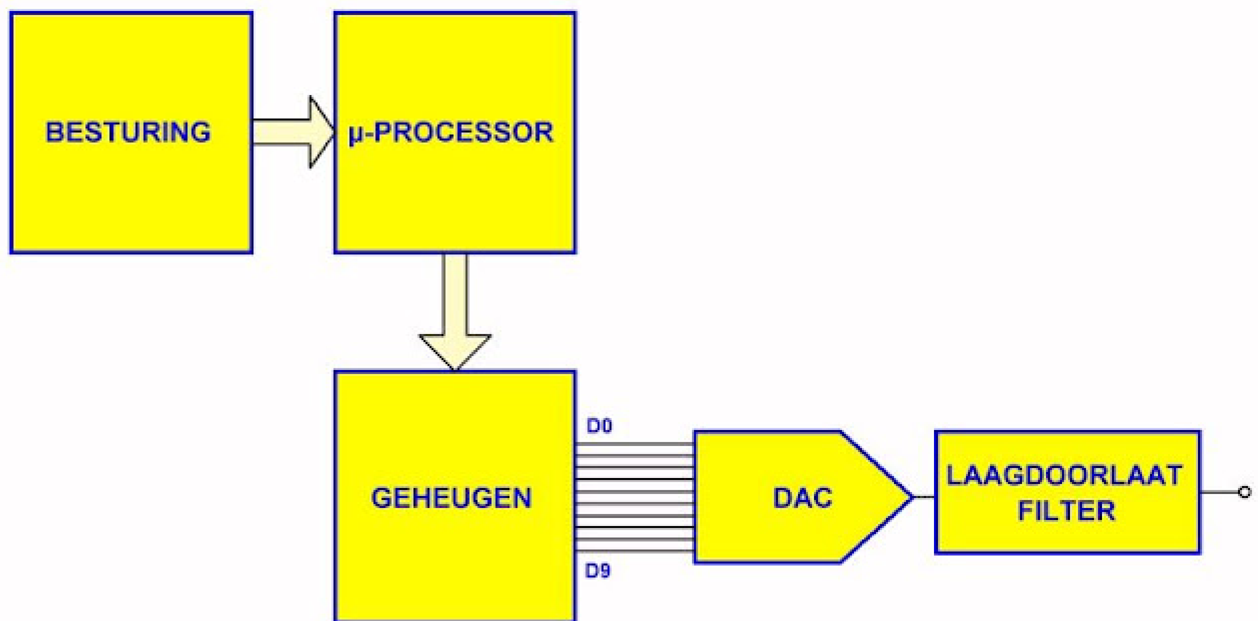
Een standaard uitgangstrap van een analoge functiegenerator. (© 2019 Jos Verstraten)

De werking van digitale functiegeneratoren

Het principe van DDS functiegeneratoren

DDS staat voor *'Direct Digital Synthesis'*. Dat betekent op digitale wijze opwekken van analoge signalen. Eén periode van een analoog signaal wordt verdeeld in een groot aantal stapjes en van ieder stapje wordt de grootte vastgelegd in een digitale code, een zogenaamd *'sample'*. Al deze samples vormen een digitale *'signaalvorm-tabel'* die in het geheugen van het apparaat wordt opgeslagen. Deze signaalvorm-tabel wordt met een instelbare frequentie uitgelezen. De opeenvolgende digitale samples worden door een digitaal naar analoog converter (DAC) omgezet in een analoge spanning.
Het grote voordeel van het DDS-principe is dat u gelijk welke golfvorm in het geheugen kunt programmeren om deze nadien door de functiegenerator *'af te laten spelen'*. DDS-generatoren van het betere soort hebben dan ook een interface waarmee u het apparaat op uw PC kunt aansluiten. Via speciale software kunt u op uw PC een digitale signaalvorm-tabel samenstellen voor een specifieke signaalvorm en deze in het geheugen van de functiegenerator laden.
Als u de generator instelt op een bepaalde golfvorm en een bepaalde frequentie zorgt de software ervoor dat de digitale signaalvorm samples die in het geheugen zijn opgeslagen door de microcontroller in de juiste volgorde en met de juiste snelheid op de datalijnen worden gezet. Via een DAC (digitaal naar analoog converter) worden deze digitale samples omgezet in analoge spanningen die een trapvormige benadering van het gewenste

uitgangssignaal samenstellen. Na de DAC volgt meestal nog een laagdoorlaat filter met als taak de trapjes van de *'trapvormige benadering'* zo goed mogelijk af te vlakken.



Het blokschema van een digitale functiegenerator. (© 2019 Jos Verstraten)

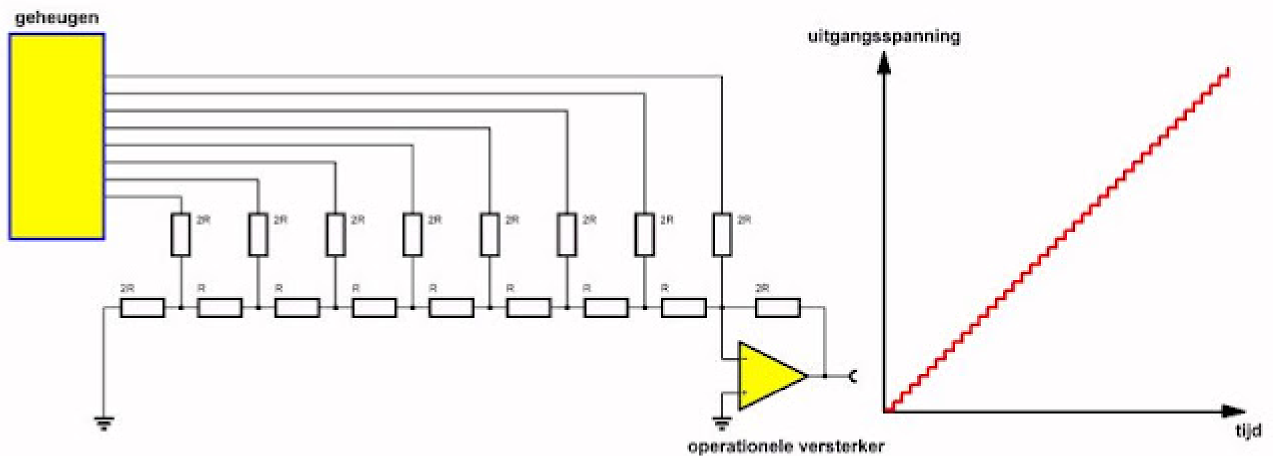
Hoe meer data-bits en samples, hoe mooier de uitgangsspanning
Het zal duidelijk zijn dat de uitgangsspanningen mooier worden als de analoge spanningen worden gereconstrueerd uit meer digitale gegevens, dus uit meer data-bits en uit meer digitale samples. Goedkope digitale functiegeneratoren werken met slechts acht data-bits en 512 samples per periode en dan zijn de trapjes van de *'trapvormige benadering'* nog goed te zien in het uitgangssignaal, zie onderstaand oscillogram. Als u prijs stelt op kwaliteit moet u het zoeken in generatoren die met tien of zelfs twaalf bits werken en een periode samenstellen uit 2.056 samples.



De 'trapvormige benadering' bij een functiegenerator die werkt met tien data-bits. (© 2019 Jos Verstraten)

De digitaal naar analoog omzetter
Er zijn diverse systemen ontwikkeld waarmee u opeenvolgende digitale samples kunt omzetten in een analoge spanning. De kwaliteit van deze schakeling bepaalt in hoge mate de zuiverheid van de uitgangsspanning van de functiegenerator.
In goedkope digitale functiegeneratoren wordt gebruik gemaakt van een zogenaamde *'R-2R DAC'* en dat is zonder twijfel de eenvoudigste en vooral goedkoopste DAC-schakeling die

denkbaar is. Het principe is getekend in onderstaande figuur bij een systeem dat werkt met acht bits. Met wat kennis van netwerk-theorie is aan te tonen dat op de uitgang van de op-amp een driehoekvormige spanning ontstaat als u de digitale samples aan de ingang laat stijgen van 'L-L-L-L-L-L-L-L' tot 'H-H-H-H-H-H-H-H' en weer te laten dalen tot 'L-L-L-L-L-L-L-L'. U krijgt dan op de uitgang een trapvormige benadering van een driehoek. Door de codes die uit het geheugen worden gelezen aan te passen kunt u op dezelfde manier een sinus, een rechthoek of een zaagtand benaderen.
Het nadeel van deze omvormer ligt voor de hand. Op alle punten van deze schakeling liggen verborgen parasitaire capaciteiten naar de massa. Deze vormen met de weerstanden laagdoorlaat filters die de weergave van hoge frequenties nadelig beïnvloeden.



De werking van een 'R-2R DAC'. (© 2019 Jos Verstraten)

Functiegeneratoren voor de hobby-elektronicus

Van een tientje tot meer dan honderd euro
Nieuwe hobby-generatoren kunt u, als bouwpakket of als kant-en-klaar apparaat, kopen met prijzen van € 5,00 tot € 150,00. Als u op zoek bent naar een functiegenerator voor uw hobby-lab moet u dus op de eerste plaats een lijstje maken van welke wensen u hebt wat betreft frequentiebereik, het soort uitgangssignalen en de instelling van de uitgangsspanning.

Analoog koopt u tweedehands
Wij hebben al geschreven dat u, met wat geluk, prachtige oude analoge functiegeneratoren kunt kopen voor een paar tientjes. Zoeken op eBay naar *'function generator'* levert tientallen hits op, zoals de onderstaande Wavetek 110B voor nog geen twintig dollar. Let er echter op dat de meeste eBay aanbiedingen vanuit de Verenigde Staten komen en dat u vaak heel hoge verzend- en inklaringskosten moet betalen. Ook op Marktplaats en op Marketplace treft u soms mooie aanbiedingen aan, met als voordeel dat deze lokaal zijn. Uitstekende merken waren Philips, HP (Hewlett Packard), Wavetek, Dynascan en GW Instek.



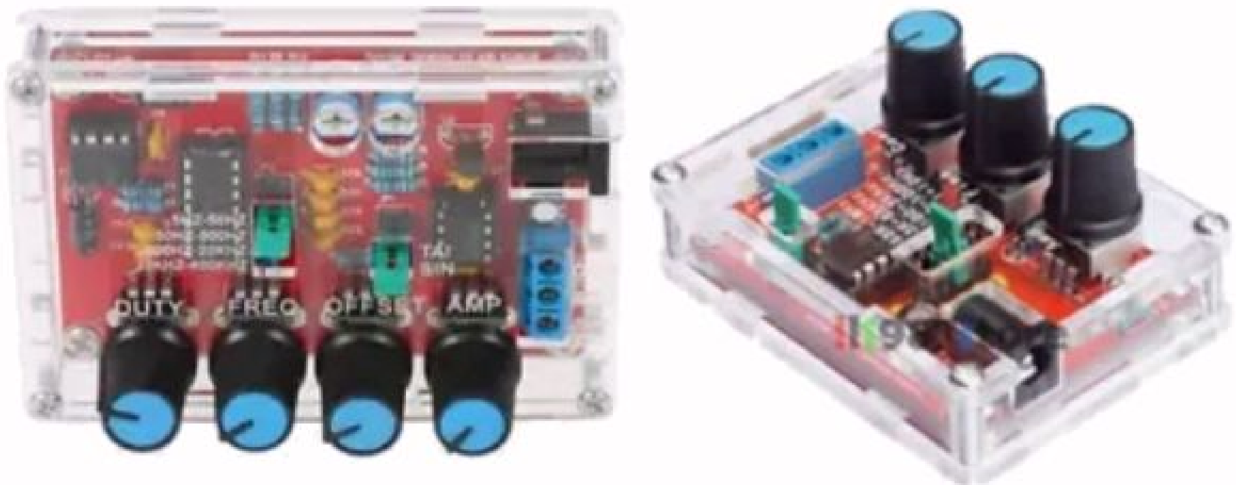
Wavetek Model 110B Function Generator

$19.95
0 bids
Watch

3d 8h left (Tue, 11:49 PM)
From United States

Een prachtige tweedehands aanbieding op eBay. (© 2019 Jos Verstraten)

Analoge bouwpakketjes rond de tien euro
Voor wie niet erg hoge eisen stelt en alleen met laagfrequent schakelingen werkt bestaan er twee Chinese bouwpakketjes van analoge functiegeneratoren die voor rond de tien euro worden aangeboden. Deze maken gebruik van twee oeroude IC's, de XR2206 en de ICL8038, die nu door Chinese fabrikanten als second source nog steeds worden gebakken. In de onderstaande foto ziet u hoe die apparaatjes er uit zien. Er is uiteraard op alles bezuinigd dat meer dan één euro kost. U moet de apparaatjes voeden uit een netstekkervoeding. Bereikenomschakelaars zijn vervangen door jumpertjes op de print. BNC-connectoren zijn uiteraard uit den boze bij dergelijke goedkope apparaatjes. De uitgangssignalen worden aangeboden op printkroonsteentjes.



Twee spotgoedkope analoge functiegeneratoren die als bouwpakketje worden aangeboden. (© 2019 Jos Verstraten)

Een analoog bouwpakketje van twintig euro
Via AliExpress en eBay kunt u voor ongeveer € 18,00 een bouwpakketje van een functiegenerator kopen met de MAX038 als basis. Het frequentiebereik gaat tot 20 MHz, althans volgens de aanbieders. Dat dit niet wordt waargemaakt bewijst onze test van dit bouwpakketje. Tóch is, voor de hobbyist die niet veel geld aan zijn of haar hobby wil of kan uitgeven, dit bouwpakketje een interessante en bruikbare optie. Het is bovendien een goede eerste oefening in het solderen van SMD-componentjes.



Een analoge functiegenarator met een MAX038. (© AliExpress)

Digitale functiegeneratoren onder vijfentwintig euro
Al iets betere apparaatjes, maar toch nog met een heleboel beperkingen. De FG-050 levert de vijf basis signaalvormen plus ruis en een electrocardiogram signaal (ECG). Het frequentiebereik gaat van 1 Hz tot 65,534 kHz bij een maximale uitgangsspanning van 15 $V_{top-tot-top}$. De FG-100 levert sinussen tot 500 kHz en de overige signalen tot 20 kHz bij een maximale uitgangsspanning van 10 $V_{top-tot-top}$.



Twee zeer betaalbare digitale functiegeneratoren, links de FG-050, rechts de FG-100. (© 2019 Jos Verstraten)

Digitale functiegeneratoren tot vijftig euro
In die prijsklasse is een aantal alweer Chinese digitale functiegeneratoren te koop. Maar naar onze mening is de béste functiegenerator voor het hobby-lab in die prijsklasse de FY3200S of FY3224S, die onder diverse merknamen wordt aangeboden. Dit apparaat werkt met twaalf data-bits en met 2.048 samples per periode van het signaal. De maximale frequentie bedraagt 24 MHz. U kunt vrijwel alle parameters van het signaal digitaal instellen, dus ook de amplitude. Het apparaat heeft een sweep-modus en uiteraard amplitude- en frequentiemodulatie. Wij hebben er zelf eentje en zijn er zeer tevreden over. Nadeel is wel dat u het apparaat alleen met drukknopjes en één draai-encoder kunt bedienen. Persoonlijk zijn wij hiervan niet zo gecharmeerd, maar dat nadeel wordt ruimschoots gecompenseerd door de

veelheid aan mogelijkheden en functies die deze functiegenerator biedt.



De FY3200S, een DDS-generator die wij van harte aanbevelen aan iedere hobbyist. (© Banggood)

Digitale functiegeneratoren van meer dan honderd euro
Ook in die prijsklasse is een aantal alweer Chinese digitale functiegeneratoren te koop. Maar naar onze mening is de béste functiegenerator voor het hobby-lab in die prijsklasse de UTG9005C-II van Uni-Trend Technology (UNI-T). Met zijn prijs van € 120,00 produceert deze generator zijn uitgangssignalen tot 5 MHz met een resolutie van 14 bit en een sampling-rate van 125 MSa/s.



De UTG9005C-II van Uni-Trend ten voeten uit. (© UNI-T)

Een extra uitgang op de achterzijde van het apparaat levert een maximaal vermogen van 4 $W_{effectief}$ in een belasting van 8 Ω. De maximale uitgangsspanning bedraagt 23 $V_{top-tot-top}$ en de maximale uitgangsstroom 750 mA. De bandbreedte van deze vermogensversterker bedraagt 200 kHz, de uitgangsimpedantie minder dan 2 Ω.